

# Intercambiadores de Calor. Fundamentos Ingeniería Térmica

1.- Tipos de Intercambiadores de Calor. El coeficiente global de Transferencia de Calor
---

2.-Análisis de los Intercambiadores de Calor. Método de la diferencia de temperatura media logaritmica. Método de la efectividad NTU Intercambiadores de Calor
--

3.- Selección de los Intercambiadores de Calor
--

JUAN CARLOS LOZANO MEDINA

INGENIERO INDUSTRIAL

PROFESOR ASOCIADO ULPGC

ISBN 978-84-16989-27-0

1 DE SEPTIEMBRE DE 2014

**6.1. Introducción**

**6.2. Tipos de intercambiadores de calor**

**6.3. Coeficiente global de transferencia de calor U**

**6.4. Balances de flujos de calor entre los fluidos**

**6.4.1. Intercambiadores de calor doble tubo**

**6.4.2. Intercambiadores de tubo carcasa**

**6.4.3. Intercambiadores de flujo cruzado**

**6.5. Método de Efectividad-NTU**

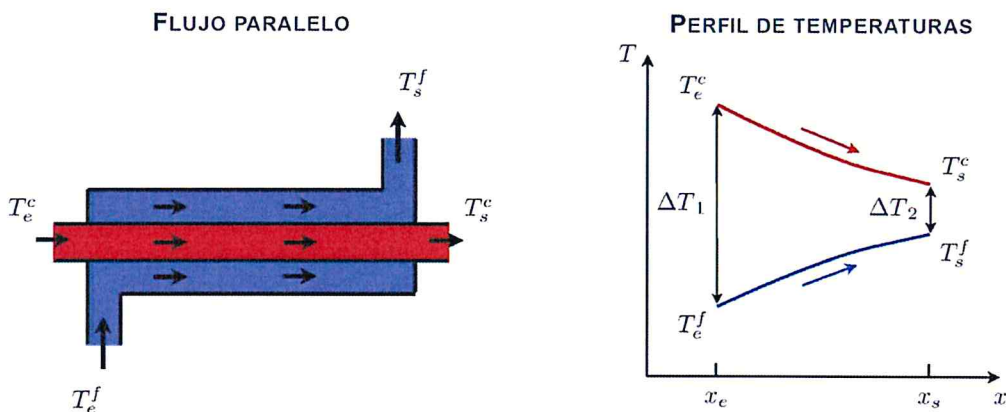
### 6.1. INTRODUCCIÓN

Los intercambiadores de calor son dispositivos que se utilizan para llevar a cabo el proceso de transferencia de calor entre dos fluidos que están a diferentes temperaturas, evitando al mismo tiempo, que se mezclen entre sí. Son de uso común en una amplia variedad de aplicaciones: desde los sistemas domésticos de calefacción y aire acondicionado, hasta la producción de energía en grandes centrales o los procesos químicos.

### 6.2. TIPOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

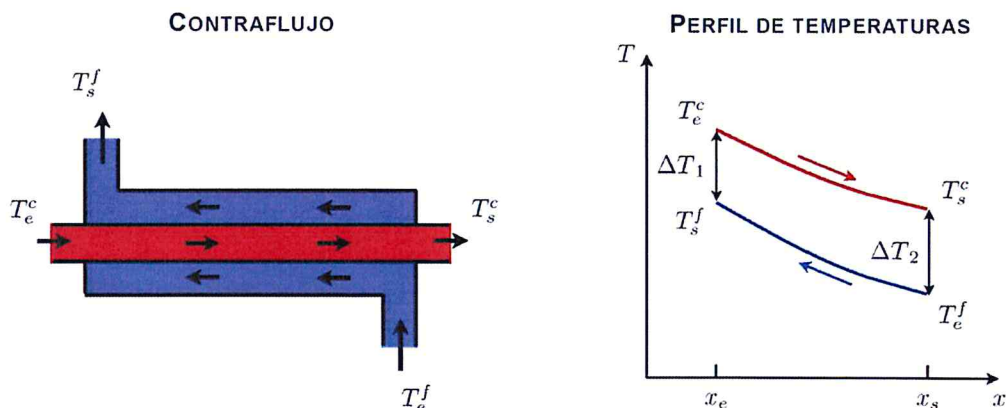
1. El tipo más simple de IntQ consta de dos tubos concéntricos de diferentes diámetros. Se llama también IQ de tubo doble. Los fluidos pueden moverse en paralelo o en contracorriente:

a) En el de flujo paralelo, los fluidos frío y caliente entran por el mismo extremo, fluyen en la misma dirección y salen por el mismo extremo.



En el diagrama del perfil de temperaturas se observa como la temperatura del fluido caliente va disminuyendo a lo largo de la conducción y la temperatura del fluido frío aumenta a lo largo de la conducción.

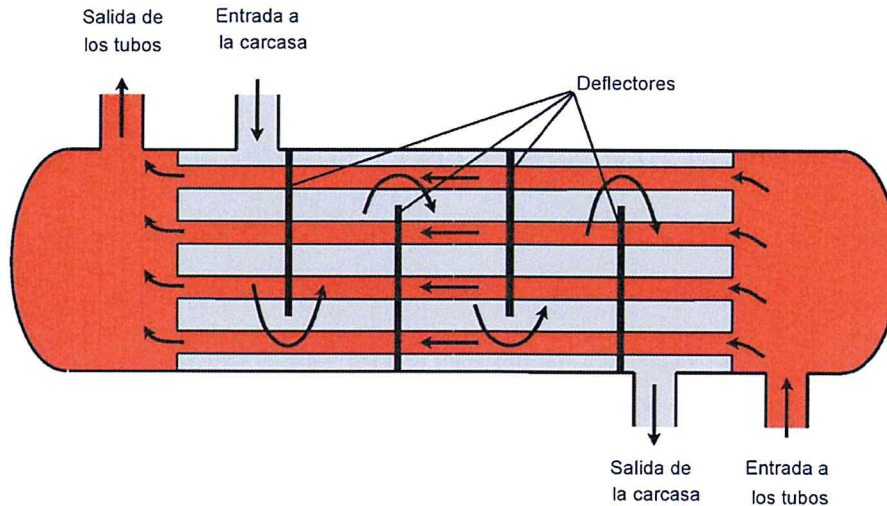
b) En el de contracorriente, los fluidos entran por extremos opuestos, fluyen en direcciones opuestas y salen por extremos opuestos.



En este caso los perfiles de temperatura son diferentes. No hay una diferencia de temperaturas tan brusca en ningún punto del IntQ.

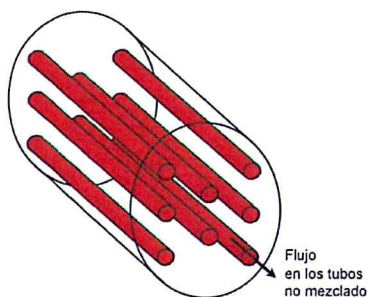
2. El Int de Tubo y Carcasa es el más común en las instalaciones industriales:

### INTERCAMBIADOR DE TUBO CARCASA



Tiene un gran número de tubos empacados, con sus ejes paralelos al de la carcasa. Uno de los fluidos circula por el interior de los tubos y el otro los rodea. El fluido que circula por los tubos se acumula en los cabezales, antes de entrar o salir de la carcasa

Una sección de la carcasa podría ser la siguiente:



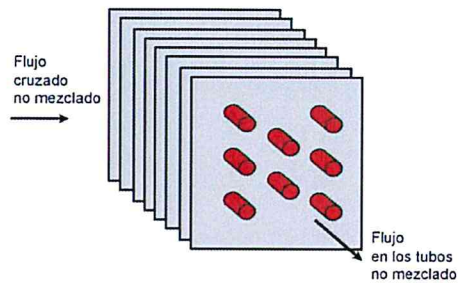
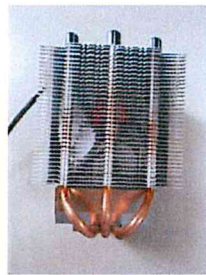
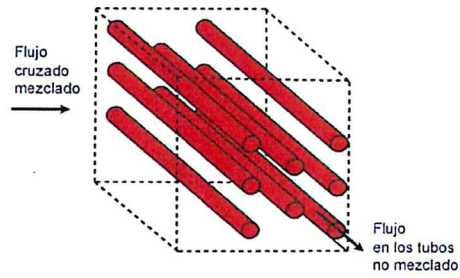
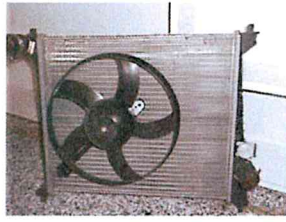
En la carcasa se colocan deflectores para inducir turbulencia en el fluido, con lo cual se aumenta el coef de convección. (También tienen la misión de mantener el espaciado entre los tubos).

3. En los intQ de flujo cruzado, los fluidos se mueven perpendiculares entre sí. Uno de los fluidos circula por el interior de unos tubos y el otro por el exterior, rodeando los tubos.

A su vez se pueden clasificar en de flujo mezclado y no mezclado según sea el flujo del fluido exterior. En los de flujo no mezclado, el fluido exterior está forzado a circular en dirección perpendicular a los tubos, por el efecto de unas aletas. En los de flujo mezclado, el fluido exterior puede moverse en otras direcciones.

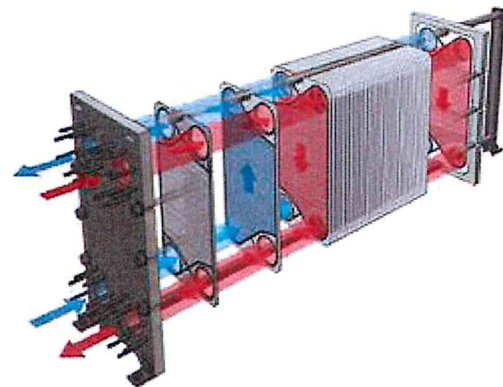
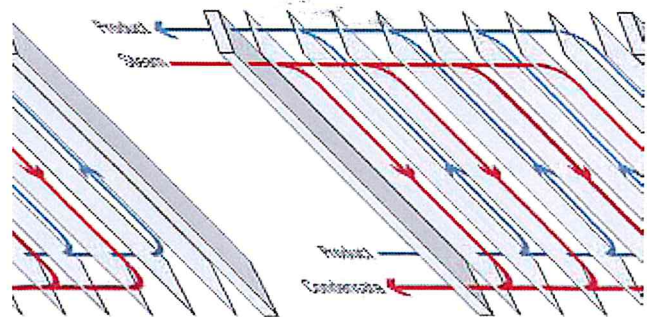
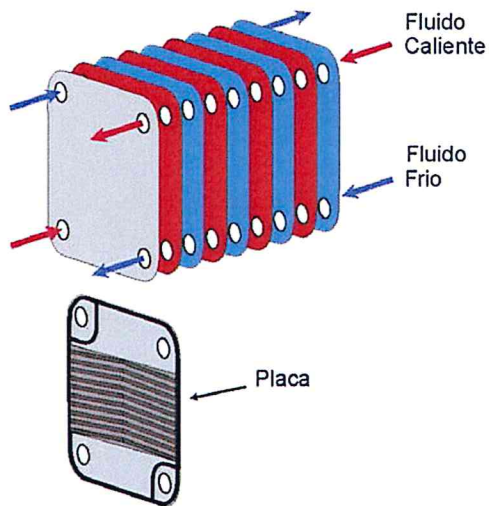


Ej: radiador de un automóvil (flujo no mezclado)



Los intQ de flujo cruzado normalmente son de tipo compacto: tienen un área superficial de transferencia de calor muy grande por unidad de volumen.

#### 4. Intercambiadores de placas



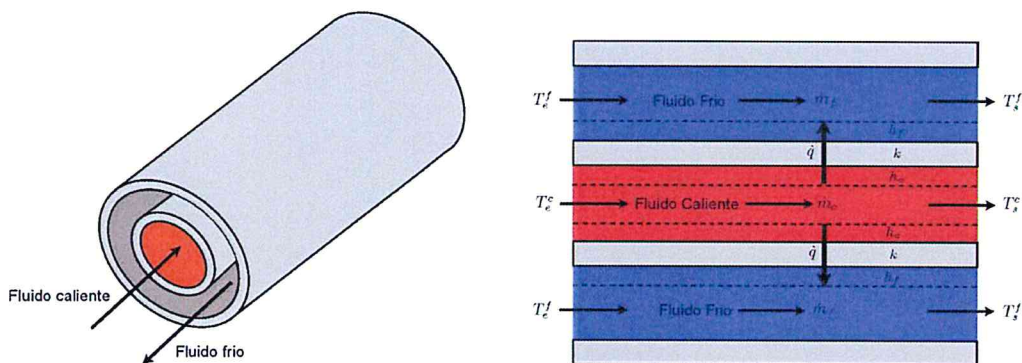
Consta de una serie de placas con pasos "aplastados" para el flujo. Cada corriente de fluido frío queda rodeado por dos placas de fluido caliente. Se produce una transferencia de calor muy eficaz. Además es muy sencillo ampliarlos, simplemente montando más placas.

Hay intQ que reciben nombres específicos: condensador, evaporador, caldera, regenerador...

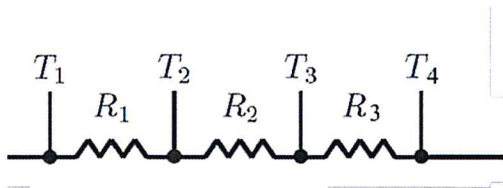
## 6.3 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Un intQ por lo general, está formado por dos fluidos que fluyen separados por una pared sólida. La transferencia de calor suele comprender convección en cada fluido y conducción a través de la pared que los separa. En el estudio de los intQ resulta conveniente trabajar con un coeficiente de transferencia de calor global,  $U$ , que tiene en cuenta la contribución de todos estos efectos.

En primer lugar, el calor se transfiere se transfiere del fluido caliente hacia la pared por convección, después a través de la pared por conducción y, por último, de la pared hacia el fluido frío de nuevo por convección. (Los efectos de radiación suelen incluirse en los coef de transferencia de calor por convección).



La red de resistencias térmicas asociada con este proceso de transferencia de calor comprende dos resistencias por convección y una por conducción:



- $T_1$  es la temperatura del fluido caliente
- $T_2$  la temp de la pared interna del fluido caliente
- $T_3$  la temp de la pared externa del fluido caliente (interna del fluido frío)
- $T_4$  la temp del fluido frío

Recordando que para un cilindro la resistencia de conducción venía dada por:

$$R = \frac{\ln \frac{r_e}{r_i}}{2\pi Lk}$$

Entonces la resistencia térmica total queda:

$$R_{total} = R_{hc} + R_{tub} + R_{hf} = \frac{1}{h_c A_i} + \frac{\ln \frac{D_e}{D_i}}{2\pi L k} + \frac{1}{h_f A_e}$$

- $A_i$  es el área de la pared interior del fluido caliente
- $A_e$  es el área exterior de esa misma pared

Combinando todas las resistencias térmicas, podemos calcular la transferencia de calor como:

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R_T} = U \cdot A \cdot \Delta T$$

Donde U es el coef de transferencia de calor total

Lo único que sucede es que como el área interna y el externa no son iguales, tendremos dos coef de transmisión globales, dependiendo del área que estemos considerando:

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R_T} = U \cdot A \cdot \Delta T = U_i \cdot A_i \cdot \Delta T = U_e \cdot A_e \cdot \Delta T$$

Nótese que  $U_i \cdot A_i = U_e \cdot A_e$  aunque  $U_i \neq U_e$  a menos que las áreas sean iguales.

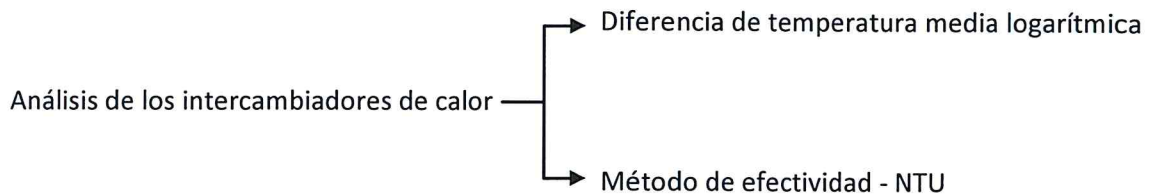
Cuando la pared del tubo es pequeña y la conductividad térmica del material es alta, las superficies interior y exterior son aproximadamente iguales y su resistencia térmica puede ser despreciable. Entonces, el cálculo del coef de calor global se puede simplificar:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_f}$$

Los coeficientes de transmisión de calor por convección se obtienen con las correlaciones propuestas en el capítulo anterior.

El coef de calor global es dominado por el coef de convección más pequeño (puesto que el inverso de un número grande es pequeño). Cuando uno de los coef de convección es mucho más pequeño que el otro, Ej:  $h_i \ll h_e$  entonces  $1/h_i \gg 1/h_e$  y, por  $U \approx h_i$  consiguiente, El coef de transmisión de calor más pequeño crea un cuello de botella en la transferencia de calor, impidiéndola gravemente. Esta situación se presenta con frecuencia cuando uno de los fluidos es un gas y el otro un líquido. Para solucionarlo, se colocan aletas en la zona del gas, con lo que se aumenta

el área de esa superficie y disminuye el cociente  $1/hA$ , reduciéndose su influencia sobre  $U$ , que aumenta.



#### 6.4. BALANCES DE FLUJO DE CALOR ENTRE LOS FLUIDOS: Uso de la Diferencia de Temperatura Media Logarítmica, DTML (LMTD).

(Esto deberían haberlo dado en Termo, pero vamos a recordarlo).

En un intercambiador de calor el fluido caliente pierde energía y el fluido frío la gana. El calor cedido por el fluido caliente, por ej., se puede obtener planteando un balance de energía termodinámico:

entra = sale + acumula

Suponemos régimen estacionario, no hay acumulación de materia

$$\dot{m} \left( h_e + \frac{1}{2} c_e^2 + g z_e \right) = \dot{q} + \dot{m} \left( h_s + \frac{1}{2} c_s^2 + g z_s \right)$$

Y despreciando la variación de energía cinética y potencial:

$$\dot{q} = \dot{m} (h_e - h_s)$$

Recordamos que para un G.I.:

$$\Delta h = c_p \cdot \Delta T$$

Para un líquido lo obtenemos a partir de:  $h = u + pv \rightarrow \Delta h = \Delta u + v \Delta p$

Considerando que en un intQ  $p = \text{cte}$ :  $\Delta h = \Delta u = c_v \Delta T$



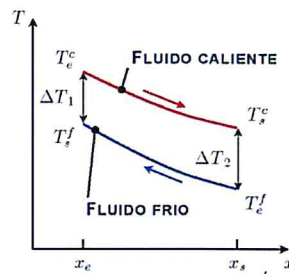
Y como en un líquido  $c = c_v = c_p$ , de forma general obtenemos que, para los fluidos que circulan por el int Q, a no ser que haya cambio de fase, el flujo de calor se puede calcular como:

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Si todo el calor cedido por el fluido caliente es absorbido por el fluido frío, el balance a todo el intercambiador quedará como:

**BALANCE CON LOS DOS FLUIDOS MODIFICANDO SU TEMPERATURA**

$$\begin{array}{ccc}
 \text{Fluido caliente} & & \text{Fluido frío} \\
 \downarrow & & \downarrow \\
 \text{Flujo de calor perdido} & = & \text{Flujo de calor ganado} \\
 \downarrow & & \downarrow \\
 \dot{m}_c \cdot c_{p_c} \cdot (T_e^c - T_s^c) & = & \dot{m}_f \cdot c_{p_f} \cdot (T_s^f - T_e^f)
 \end{array}$$



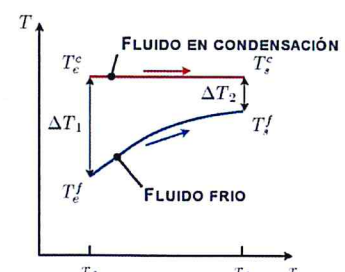
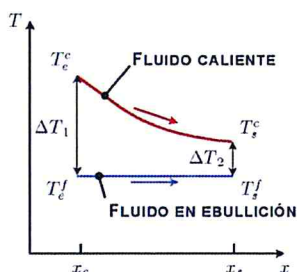
Si uno de los fluidos cambia de estado, ya no se puede aplicar lo de

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

En este caso, el flujo de calor es simplemente:

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot \Delta h = \dot{m} \cdot h_{fg}$$

$$\begin{array}{cccc}
 \text{Fluido caliente} & & \text{Fluido frío} & & \text{Fluido caliente} & & \text{Fluido frío} \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 \text{Flujo de calor perdido} & = & \text{Flujo de calor ganado} & & \text{Flujo de calor perdido} & = & \text{Flujo de calor ganado} \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 \dot{m}_c \cdot c_{p_c} \cdot (T_e^c - T_s^c) & = & \dot{m}_f \cdot h_{fg_f} & & \dot{m}_c \cdot h_{fg_c} & = & \dot{m}_f \cdot c_{p_f} \cdot (T_e^f - T_s^f)
 \end{array}$$



Pero el calor que cede el fluido caliente también se puede obtener según hemos aprendido en transferencia de calor, mediante el coeficiente global de transferencia:

$$\dot{q} = U_i \cdot A_i \cdot \Delta T = U_e \cdot A_e \cdot \Delta T$$

Como la diferencia de temperatura varía a lo largo del intercambiador, es más correcto calcularla como una media logarítmica:

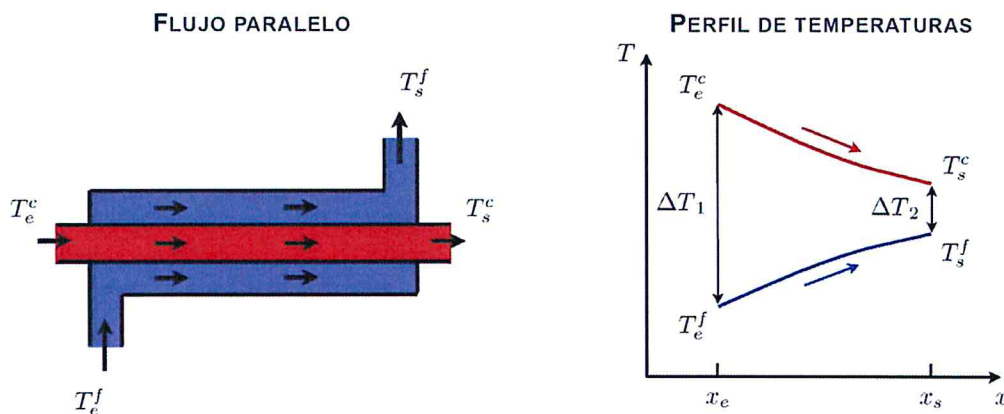
$$\dot{q} = U_i \cdot A_i \cdot \Delta T_{ln} = U_e \cdot A_e \cdot \Delta T_{ln}$$

Recordando que era:

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

Vamos a aplicar este método de análisis a los int Q que hemos visto hasta ahora:

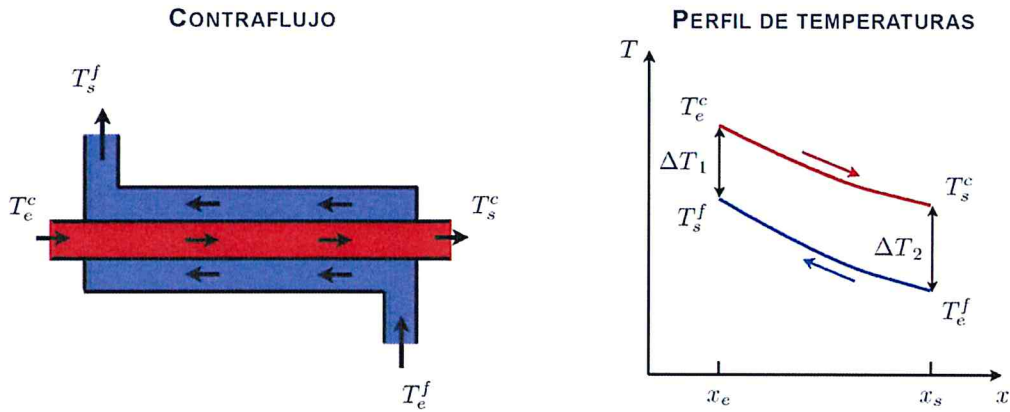
#### 6.4.1. Intercambiadores de calor de doble tubo



#### Método de la diferencia de temperatura media logarítmica

$$\dot{q} = U_i A_i \Delta T_{ln} = U_e A_e \Delta T_{ln} = \dot{m}_c c_{p_c} (T_e^c - T_s^c) = \dot{m}_f c_{p_f} (T_s^f - T_e^f)$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad \begin{aligned} \Delta T_1 &= T_e^c - T_e^f \\ \Delta T_2 &= T_s^c - T_s^f \end{aligned}$$



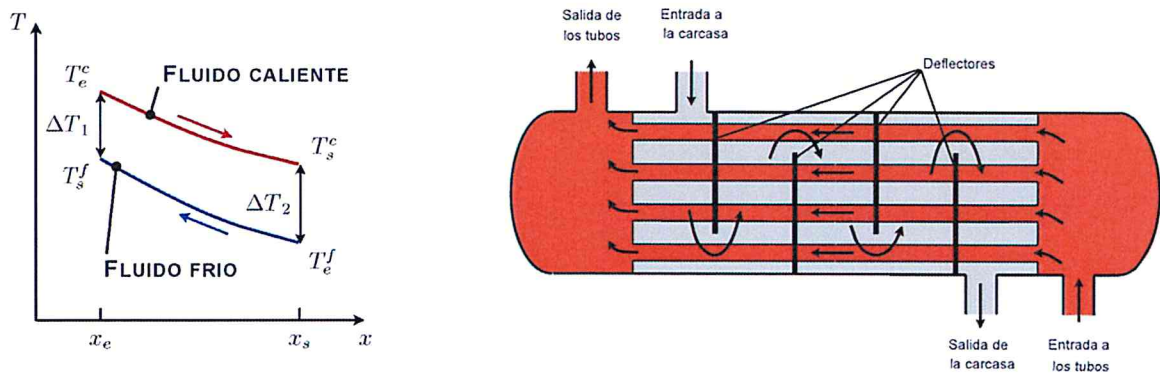
**Método de la diferencia de temperatura media logarítmica**

$$\dot{q} = U_i A_i \Delta T_{ln} = U_e A_e \Delta T_{ln} = \dot{m}_c c_{p_c} (T_e^c - T_s^c) = \dot{m}_f c_{p_f} (T_s^f - T_e^f)$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad \begin{aligned} \Delta T_1 &= T_e^c - T_s^f \\ \Delta T_2 &= T_s^c - T_e^f \end{aligned}$$

6.4.2. Intercambiadores de calor de tubo-carcasa

En estos intercambiadores, el perfil de temperaturas es de la forma:



Pero la geometría del int es algo rara, recordemos que tiene una especie de depósitos a la entrada y a la salida, donde se acumula uno de los fluidos. Normalmente operan en contracorriente y de forma que el fluido frío circula por la carcasa y el fluido caliente por los tubos (supongo que será para minimizar pérdidas con el ambiente...).

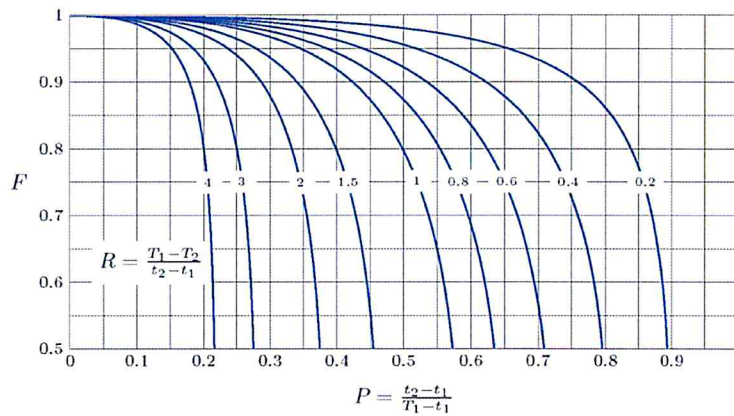
Se hace uso de un factor de forma, F, para corregir el incremento de temperatura media logarítmica teniendo en cuenta la geometría. Este factor se calcula gráficamente en función de dos parámetros, P y R, definidos como:

$$F = f(P, R)$$

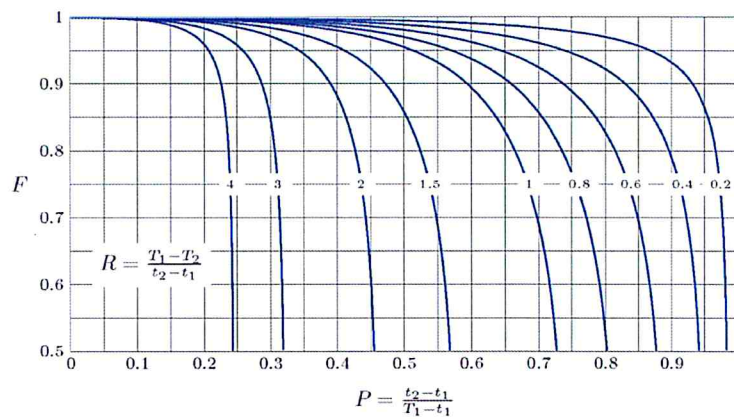
$$P = \frac{T_s^{tubo} - T_e^{tubo}}{T_e^{carcasa} - T_e^{tubo}}$$

$$R = \frac{T_e^{carcasa} - T_s^{carcasa}}{T_s^{tubo} - T_e^{tubo}}$$

- Un paso por la carcasa y 2, 4, 6, etc pasos por los tubos.



- Dos pasos por la carcasa y 4, 8, 12, etc pasos por los tubos.



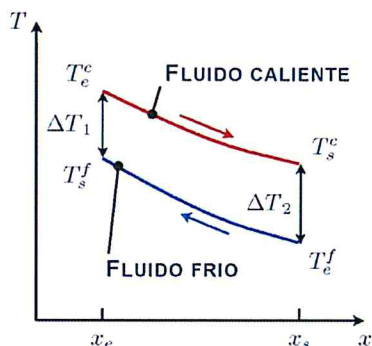


6.4.3. Intercambiadores de calor de flujo cruzado

Se considera que operan en contracorriente y también hay que tener en cuenta un factor de flujo para corregir el efecto de la geometría sobre la diferencia de temperaturas media logarítmica:

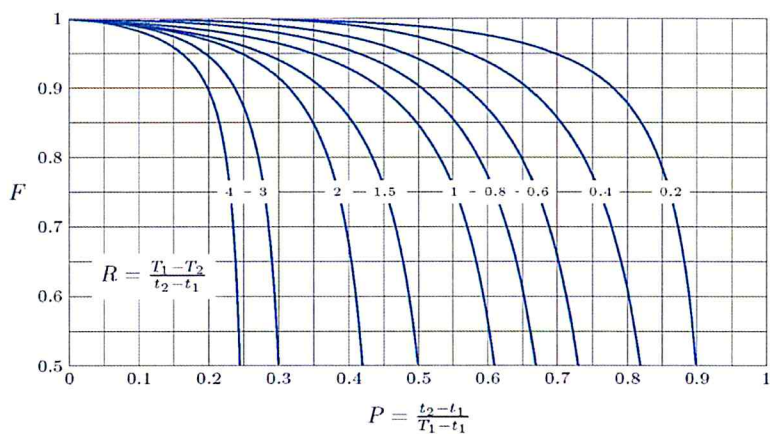
$$\dot{q} = UAF\Delta T_{lm}$$

$$F = f(P, R) \rightarrow \text{Método gráfico}$$

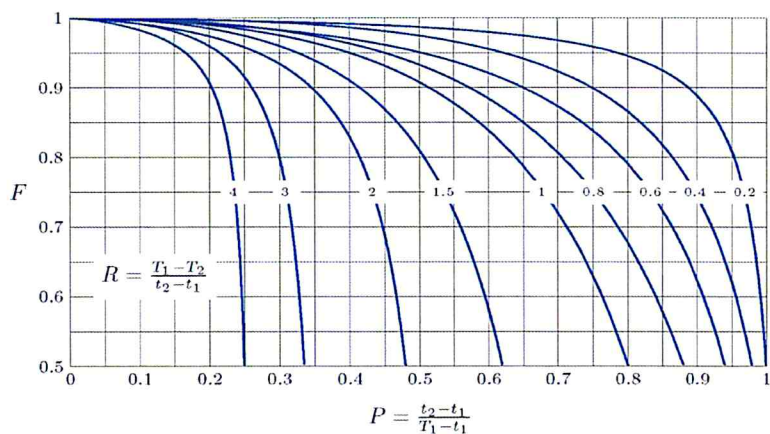


Py R se definen igual que para el intQ de tubo-carcasa.

- Un solo paso con un fluido mezclado y el otro no.



- Un solo paso con los dos fluidos no mezclados.



## 6.5. MÉTODO DE EFECTIVIDAD-NTU

El método de la DTML es fácil de aplicar cuando se conocen o se pueden determinar las temperaturas de entrada y salida de las corrientes fría y caliente. Pero cuando sólo se conocen las temperaturas de entrada, el método DTML requiere de un procedimiento iterativo. En estos casos, es más fácil utilizar el método de eficiencia o NTU.

La eficiencia de un intQ se define como el cociente entre la transferencia de calor real que tiene lugar, y la máxima posible:

$$\varepsilon = \frac{\dot{q}_{real}}{\dot{q}_{max}}$$

La transferencia de calor real se calcula mediante el balance de energía:

$$\dot{q}_{real} = C_c (T_e^c - T_s^c) = C_f (T_s^f - T_e^f)$$

siendo

$$C_c = \dot{m}_c \cdot c_{p,c}$$

$$C_f = \dot{m}_f \cdot c_{p,f}$$

Que se denominan razones de capacidad calorífica de los fluidos caliente y frío, respectivamente.

Por similitud, la transferencia de calor máxima se define como la razón de capacidad calorífica mínima multiplicada por la diferencia de temperaturas máxima.

$$\dot{q}_{max} = C_{min} \Delta T_{max} = C_{min} (T_e^c - T_e^f)$$

La diferencia de temperaturas máxima es fácil reconocer que es la diferencia entre las temperaturas de entrada de los fluidos caliente y frío:

$$\Delta T_{max} = (T_e^c - T_e^f)$$

$C_{min}$  es el valor más pequeño entre  $C_c$  y  $C_f$ . Veamos por qué:

$$\text{Puesto que } \dot{q} = C_c (T_e^c - T_s^c) = C_f (T_s^f - T_e^f)$$

Si  $\dot{m}_c \cdot c_{p,c} = \dot{m}_f \cdot c_{p,f}$  entonces y sólo entonces,  $\Delta T_c = \Delta T_f$

Si  $C_c < C_f$  entonces,  $\Delta T_c > \Delta T_f$  con lo cual el fluido frío experimenta el cambio de temperatura más grande. En el caso óptimo si la longitud del tubo se pudiera considerar como infinita, el fluido frío se calentaría hasta la temperatura de entrada del fluido caliente, es decir,  $T_s^f = T_e^c$

Con lo que el flujo de calor se podría calcular como:

$$\dot{q} = C_f (T_s^f - T_e^f) = C_f (T_e^c - T_e^f)$$

Que además será el  $q_{\max}$  posible.

Si  $C_c > C_f$  entonces,  $\Delta T_c < \Delta T_f$  con lo cual ahora el cambio de temperatura más grande lo experimenta el fluido caliente. En el caso óptimo si la longitud del tubo se pudiera considerar como infinita, el fluido caliente se enfriaría hasta la temperatura de salida del fluido frío, es decir,  $T_s^c = T_e^f$

Con lo que el flujo de calor se podría calcular como:

$$\dot{q} = C_c (T_e^c - T_s^c) = C_c (T_e^c - T_e^f)$$

Que además será el  $q_{\max}$  posible.

Luego, en general, el  $q_{\max}$  posible se puede expresar como:

$$\dot{q}_{\max} = C_{\min} (T_e^c - T_e^f)$$

La eficiencia es adimensional y debe cumplir:  $0 \leq \varepsilon \leq 1$

Def: Número de unidades de transferencia:

Es un parámetro adimensional definido como:

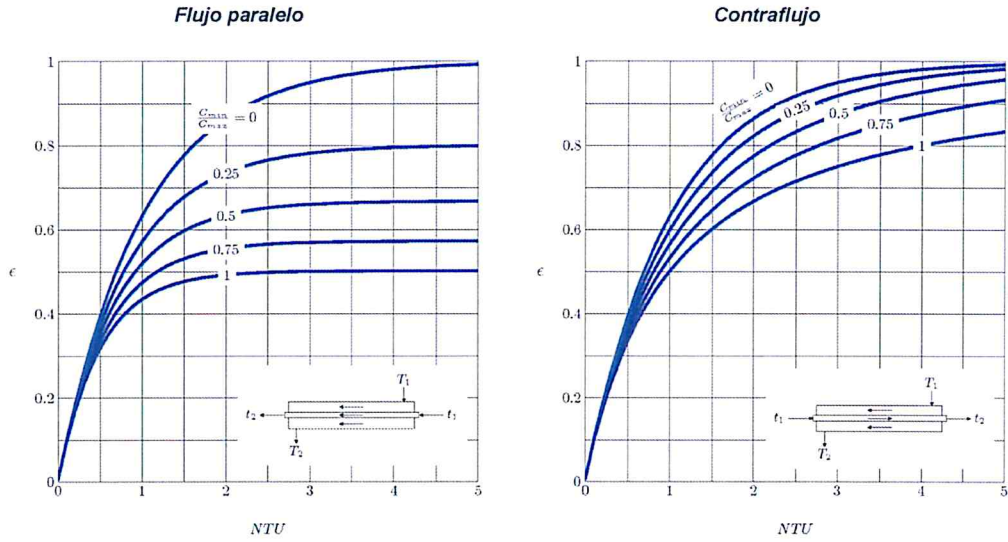
$$NTU = \frac{U \cdot A}{C_{\min}}$$

Para cualquier int Q la eficiencia se puede obtener en función del NTU y del cociente  $\frac{C_{\min}}{C_{\max}}$ :

$$\varepsilon = f\left(NTU, \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)$$

Para obtener este valor existen gráficas para cada tipo de int Q:

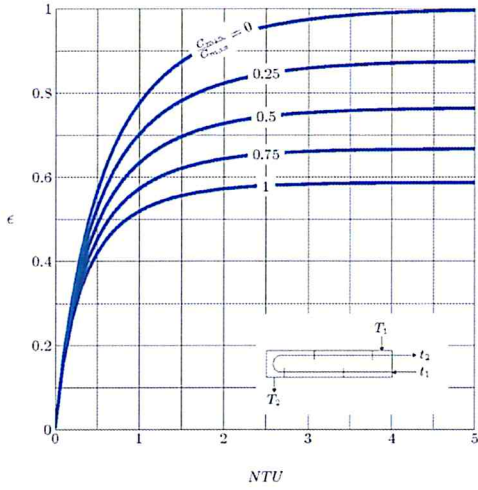
**EFFECTIVIDAD INTERCAMBIADOR DE DOBLE TUBO**



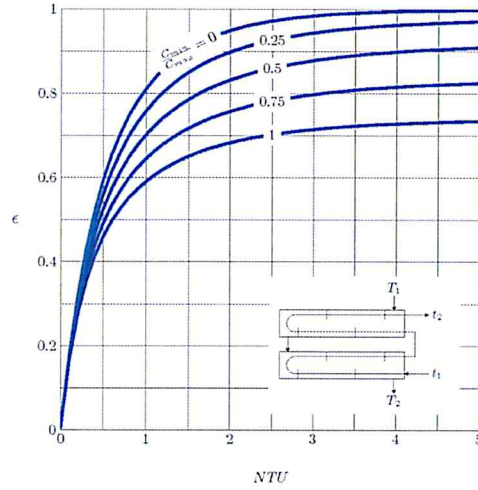


**EFFECTIVIDAD INTERCAMBIADOR DE TUBO CARCASA**

*Un paso por la carcasa y 2, 4, 6 pasos por los tubos*

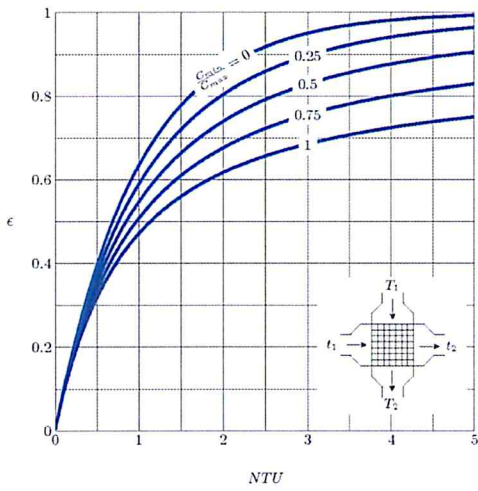


*Dos pasos por la carcasa y 4, 8, 12 pasos por los tubos*



**EFFECTIVIDAD INTERCAMBIADOR DE FLUJO CRUZADO**

*Flujo cruzado con fluidos no mezclados*



*Flujo cruzado con un fluido mezclado*

